

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2004 年 8 月 12 日 (12.08.2004)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2004/068195 A1

- (51) 国際特許分類: G02B 1/02
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2004/000107
- (22) 国際出願日: 2004 年 1 月 9 日 (09.01.2004)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2003-024936 2003 年 1 月 31 日 (31.01.2003) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): TDK 株式会社 (TDK CORPORATION) [JP/JP]; 〒1038272 東京都中央区日本橋一丁目 1 3 番 1 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 榎戸 靖 (ENOKIDO, Yasushi) [JP/JP]; 〒1038272 東京都中央

区日本橋一丁目 1 3 番 1 号 TDK 株式会社内 Tokyo (JP). 中畑 功 (NAKAHATA, Isao) [JP/JP]; 〒1038272 東京都中央区日本橋一丁目 1 3 番 1 号 TDK 株式会社内 Tokyo (JP).

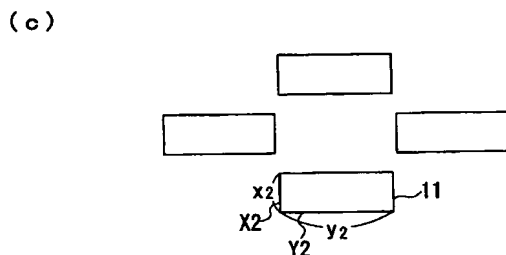
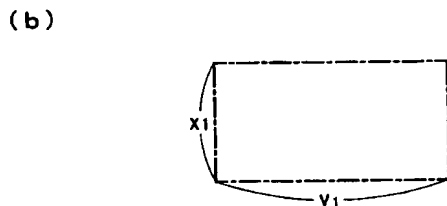
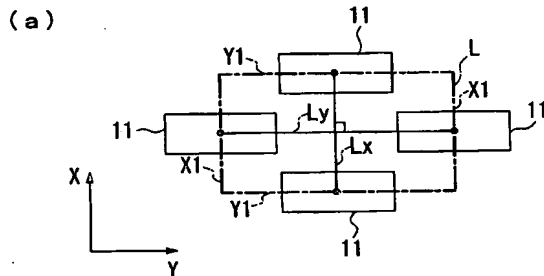
(74) 代理人: 大場 充 (OBA, Mitsuru); 〒1010032 東京都千代田区岩本町 1 丁目 4 番 3 号 KMビル 8 階大場国際特許事務所 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

[続葉有]

(54) Title: TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL

(54) 発明の名称: 2次元フォトリック結晶



(57) Abstract: A two-dimensional photonic crystal, wherein in a plane in which a rectangle whose shorter side (X1) is (x1) in length and whose longer side (Y1) is (y1) in length is used as a unit lattice (L) and four adjoining unit lattices (L) are disposed so as to have one angle in common, a first columnar dielectric region having a rectangular cross-section whose shorter side (X2) is (x2) in length and whose longer side (Y2) is (y2) in length is disposed on the shorter side (X1) and longer side (Y1) of each rectangular unit lattice (L). In this two-dimensional photonic crystal, the first dielectric region is disposed so that the midpoint of the shorter side (X1) and the midpoint of the longer side (Y1) and the center of the rectangular cross-section substantially coincide, and the longer sides (Y2) of each first dielectric region are substantially parallel to each other.

(57) 要約: 短辺 X1 の長さが x1、長辺 Y1 の長さが y1 である長方形を単位格子 L とし、隣接する 4 つの単位格子 L が 1 つの角を共有するように配列された平面上で、短辺 X2 の長さが x2、長辺 Y2 の長さが y2 である長方形断面を有する柱状の第 1 誘電体領域を、各長方形の単位格子 L の短辺 X1 および長辺 Y1 上に配置した 2 次元フォトリック結晶である。この 2 次元フォトリック結晶において、短辺 X1 の中点および長辺 Y1 の中点と長方形断面の中心が略一致するように第 1 誘電体領域が配置され、各第 1 誘電体領域の長辺 Y2 同士が互いに略平行をなしている。



(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

明 細 書

2次元フォトニック結晶

5 技術分野

本発明は2次元フォトニック結晶に関する。

背景技術

- 近年、誘電率を周期的に変化させた2次元または3次元の構造体であるフォ
10 トニック結晶が注目されている。ここで、2次元、3次元とは、周期性を有す
る方向の数に基づいて定められる。2種類の誘電体の周期構造からなるフォ
トニック結晶に電磁波が入射してブラッグ回折を起こすと2つの定在波が生じる。
低誘電率領域で生じる高エネルギーの定在波と、高誘電率領域で生じる低エネ
15 ルギの定在波である。これら2つの定在波のエネルギーの間にあるエネルギー
を有する波が存在できないため、フォトニック結晶中にはフォトニックバンドギャ
ップが発現する。フォトニックバンドギャップ中のエネルギー（波長）範囲の電磁
波は、フォトニック結晶を通過することができなくなる。なお、ここでいうフ
ォトニックバンドギャップとは、上述の現象を、結晶内電子のエネルギー準位の
バンドギャップ（禁制帯）と同様に捉えたものである。
- 20 ここで、フォトニックバンドギャップを有する結晶の内部に周期性を乱す欠
陥を導入すれば、この欠陥部分にのみ光が存在することができる。したがって、
この結晶内に欠陥を閉じた領域として作製すれば光の共振器を得ることができ
る。また、この結晶内に欠陥を線状に作製すれば導波路を得ることができる。
例えば、2次元フォトニック結晶の場合では、電界成分を周期構造の平面に平
25 行になるTE波（Transverse Electric Wave）と、垂直になるTM波（Transverse
Magnetic Wave）に分けることができる。一般的には、それぞれの光に対応する
フォトニックバンドギャップの周波数 ω の範囲は必ずしも一致しない。よって、
TE波とTM波の両方に対して同時にフォトニックバンドギャップが生じる周

波数範囲が存在する場合、そのフォトニックバンドギャップは完全バンドギャップと呼ばれることがある。

2次元構造で完全バンドギャップが存在する比較的単純な構造のフォトニック結晶が知られている。このフォトニック結晶は、例えば、特開2001-272555号公報に開示されているように誘電体中に貫通孔（空気孔）を3角格子状に配列したものである。この場合、最も広い完全バンドギャップが得られるのは半径（ r/a ）が0.48、また周波数（ $\omega a/2\pi c$ ）が0.5程度のときである。但し、 r は孔の半径、 a はフォトニック結晶の格子定数、 ω は光の角振動数、 c は真空中の光速である。

ところが、3角格子状に空気孔を配列した従来の2次元フォトニック結晶においては、完全バンドギャップが得られるのは孔の直径 $d (= 2r) = 0.95a$ のときである。このとき、孔間の壁の厚さは最小部で0.05 a 、つまり0.035 μm と極めて薄いために、完全バンドギャップが得られる2次元フォトニック結晶を作製するのが困難であった。

本発明は、このような技術的課題に基づいてなされたもので、製造が容易で、かつTE波およびTM波に対して完全バンドギャップを持つことのできる2次元周期構造を有するフォトニック結晶を提供することを目的とする。

発明の開示

本発明は短辺 X_1 の長さが x_1 、長辺 Y_1 の長さが y_1 である長方形を単位格子とし、隣接する4つの単位格子が1つの角を共有するように配列された平面上で、短辺 X_2 の長さが x_2 、長辺 Y_2 の長さが y_2 である長方形断面を有する柱状の第1誘電体領域を、各長方形単位格子の短辺 X_1 および長辺 Y_1 上に配置した2次元フォトニック結晶である。

本発明は、上記2次元フォトニック結晶において、短辺 X_1 の midpoint および長辺 Y_1 の midpoint と長方形断面の中心が略一致するように第1誘電体領域が配置され、各第1誘電体領域の長辺 Y_2 同士が互いに略平行をなしている。さらに、 $x_1 : y_1 = 1 : \text{略}\sqrt{3}$ であり、 $x_1 : x_2 : y_2 = 1 : 0.133 : 0.48$

～1 : 0. 158 : 0. 58に設定してある。

本発明の2次元フォトニック結晶において、 $x_1 : x_2 : y_2 = 1 : 0. 135 : 0. 48 \sim 1 : 0. 150 : 0. 54$ とすることが望ましく、 $1 : 0. 135 : 0. 52 \sim 1 : 0. 140 : 0. 54$ とすることがさらに望ましい。

- 5 以上の本発明によれば、第1誘電体領域は、最小でも $0. 10 \mu m \times 0. 37 \mu m$ 程度の長方形断面を有することになるから、従来の3角格子状に空気孔を配列した従来の2次元フォトニック結晶に比べて格段に製造性が優れる。しかも、後述するように、実用上十分な完全バンドギャップ幅を有している。

- 本発明の2次元フォトニック結晶において、第1誘電体領域の周囲を取り囲みかつ第1誘電体領域とは異なる誘電率を有する第2誘電体領域を備えること
10 がある。ここで、第1誘電体領域および第2誘電体領域は有体物のみならず気体を含む概念を有している。したがって本発明においては、第1誘電体領域および第2誘電体領域のいずれか一方を誘電体材料から構成し、他方を気体から構成することができる。気体の典型例が、空気である。なお、本発明において、
15 誘電体材料というときは有体物を意味するものとする。

上述した誘電体材料としては、例えば $BaO-TiO_2$ 系または $BaO-Nd_2O_3-TiO_2$ 系のものを用いることができる。

また、第1誘電体領域および第2誘電体領域を、各々異なる誘電率を有する誘電体材料で構成することもできる。

- 20 この場合に、第1誘電体領域および第2誘電体領域は焼結体とすることができる。これにより、機械的強度や誘電率がさらに向上した2次元フォトニック結晶を得ることができる。

- さらに本発明による2次元フォトニック結晶は、平板状の基部と、基部と同一の誘電体材料から構成され基部から立設する複数の第1誘電体領域とを備える形態とすることができる。第2誘電体領域は、空気等の気体とすることができるし、誘電体材料とすることもできる。
25

また本発明は、第1誘電体領域と第1誘電体領域と異なる誘電率を有する第2誘電体領域とを周期的に配置した2次元フォトニック結晶であって、長方形

断面を有する柱状の第1誘電体領域と、第1誘電体領域の周囲を取り囲む第2誘電体領域とを備え、X方向において隣接する2つの第1誘電体領域の中心同士を結ぶ線分 L_x と、X方向に直交するY方向において隣接する2つの第1誘電体領域の中心同士を結ぶ線分 L_y とが、互いの略中点同士で略直交し、線分 L_x の長さ x_3 と線分 L_y の長さ y_3 の比が $1 : \sqrt{3}$ であり、線分 L_x の長さ x_3 、第1誘電体領域のX方向の長さ x_2 およびY方向の長さ y_2 の比が $1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$ に設定されることを特徴とする。

本発明の2次元フォトニック結晶において、 $x_3 : x_2 : y_2 = 1 : 0.135 : 0.48 \sim 1 : 0.150 : 0.54$ とすることが望ましく、 $1 : 0.135 : 0.52 \sim 1 : 0.140 : 0.54$ とすることがさらに望ましい。

本発明による2次元フォトニック結晶において、第1誘電体領域および第2誘電体領域のいずれか一方を誘電体材料から構成し、他方を気体から構成することができる。

また、本発明による2次元フォトニック結晶において、第1誘電体領域および第2誘電体領域は、各々異なる誘電率を有する誘電体材料から構成することもできる。

本発明による2次元フォトニック結晶は、20.0%以上のフルバンドギャップ幅を有することができる。ここで、本発明ではフルバンドギャップが周波数に対し連続して存在している場合、その周波数幅を、周波数幅の中心周波数で割った値をフルバンドギャップ幅(%)という。

図面の簡単な説明

第1図は本発明によるフォトニック結晶の一例を示す斜視図、第2図は本発明によるフォトニック結晶の単位格子および角柱構造体の配列を示す図、第3図は本発明によるフォトニック結晶において単位格子および角柱構造体のサイズを説明するための図、第4図は本発明によるフォトニック結晶の他の例を示す斜視図、第5図はシミュレーションにより得られたフルバンドギャップ幅を

示す散布図、第 6 図はシミュレーションにより得られたフルバンドギャップ幅を示す散布図、第 7 図は本発明によるフォトリック結晶に好適な製造方法を示すフローチャート、第 8 図は本発明によるフォトリック結晶に好適な製造方法の所定の工程を示す図である。

5

発明を実施するための最良の形態

以下に本発明の実施の形態について説明する。

第 1 図は、本実施の形態におけるフォトリック結晶 1 の構造を示す斜視図である。第 1 図において、本実施の形態によるフォトリック結晶 1 は、基部 1 2 上に角柱構造体 1 1 が複数配列された構造をなしている。角柱構造体 1 1 および基部 1 2 は例えば $BaO-TiO_2$ 系、 $BaO-Nd_2O_3-TiO_2$ 系等の誘電体材料から構成することができる。角柱構造体 1 1 および基部 1 2 を構成する誘電体材料は同一であってもよいし、異なってもよい。隣接する角柱構造体 1 1 の間は空隙 1 3 であり、空隙 1 3 には空気が存在することになる。したがって、角柱構造体 1 1 が第 1 誘電体領域を、また隣接する角柱構造体 1 1 の間の空隙 1 3 が第 2 誘電体領域を構成することになる。そのため、フォトリック結晶 1 は 2 次元周期構造を有している。

第 2 図は、フォトリック結晶 1 における、第 1 誘電体領域を構成する角柱構造体 1 1 の配置を説明するための図であり、フォトリック結晶 1 を平面視した模式図である。

第 2 図に示すように、フォトリック結晶 1 上に、点線で示している正六角形が蜂の巣状に仮想的に配列されているものとする。この正六角形を構成する辺のうち、図中、Y 方向に平行な辺上に角柱構造体 1 1 を立設している。なお、第 2 図は、フォトリック結晶 1 の一部のみを記載し、かつ角柱構造体 1 1 もその一部のみを記載している。

所定の正六角形 H を取り囲む 4 つの角柱構造体 1 1 により、角柱構造体 1 1 の周期的な構造の単位が構成されているものとする。この周期的な構造の単位を本発明において単位格子 L と定義する。この単位格子 L は、X 方向に平行に

配置される 2 つの短辺 X 1 および X 方向と直行する Y 方向に配置される 2 つの長辺 Y 1 から構成され、長方形をなしている。そして、隣接する 4 つの単位格子 L は、1 つの角 C を共有している。なお、ここでいう単位格子 L は、これを並進操作することにより平面を重複も隙間も無く埋め尽くすことができるものであることは言うまでもない。

単位格子 L において、X 方向に平行に配置される 2 つの短辺 X 1 上、および Y 方向に平行に配置される 2 つの長辺 Y 1 上には各々角柱構造体 1 1 が配設される。この角柱構造体 1 1 が第 1 誘電体領域を構成する。また、角柱構造体 1 1 の周囲を取り囲む部分が第 2 誘電体領域を構成する。なお、第 2 図では角柱構造体 1 1 からなる第 1 誘電体領域を誘電体材料で構成し、その周囲に存在する第 2 誘電体領域を空気とすることを前提としているが、第 1 誘電体領域の部分を空気とし、その周囲に存在する第 2 誘電体領域を誘電体材料から構成することも可能である。また、第 4 図に示すように、第 1 誘電体材料から構成される角柱構造体 1 1 1 と、第 2 誘電体材料から構成され角柱構造体 1 1 1 を取り
15 囲む第 2 誘電体領域 1 1 3 とから本発明によるフォトニック結晶 1 0 0 を構成することができる。第 1 誘電体材料と第 2 誘電体材料は誘電率が相違する。なお、フォトニック結晶 1 0 0 の基部 1 1 2 は第 1 誘電体材料から構成されている。

本発明によるフォトニック結晶 1 は、この単位格子 L および単位格子 L 中に
20 配設される角柱構造体 1 1 のサイズに特徴を有している。そこで次に、第 3 図に基づいてこの特徴点について説明する。

第 3 図 (a) は本実施の形態によるフォトニック結晶 1 の単位格子 L を記載している。第 3 図 (b) は角柱構造体 1 1 を除き単位格子 L のみを記載し、また第 3 図 (c) は角柱構造体 1 1 のみを記載している。

25 本発明によるフォトニック結晶 1 は、第 3 図 (b) に示す単位格子 L の短辺 X 1 の長さ x_1 と長辺 Y 1 の長さ y_1 とを $x_1 : y_1 = 1 : \text{略}\sqrt{3}$ に設定する。 $x_1 : y_1$ は、厳密には $1 : \sqrt{3}$ であるが、誤差を考慮して $1 : \text{略}\sqrt{3}$ としている。本発明において、他に略を用いている場合も同様である。ここで、各々の

単位格子Lは、短辺X 1 同士、および長辺Y 1 同士が互いに略平行をなしている。また、角柱構造体1 1の短辺X 2は単位格子Lの短辺X 1と略平行をなし、長辺Y 2は単位格子Lの長辺Y 1と平行をなしている。

また、第3図(c)に示す角柱構造体1 1の短辺X 2の長さx 2と長辺Y 2の長さy 2を、 $x 1 : x 2 : y 2 = 1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$ に設定する。

ここで、第3図(a)に示すように、X方向において隣接する2つの角柱構造体1 1の中心同士を結ぶ線分L xと、Y方向において隣接する2つの角柱構造体1 1の中心同士を結ぶ線分L yとは、互いの略中点同士で略直交する。線分L xの長さ

と線分L yの長さは、 $1 : \text{略}\sqrt{3}$ の比率を有している。

また、短辺X 1上に配置される角柱構造体1 1はその中心と短辺X 1の中点とが略一致し、また長辺Y 1上に配置される角柱構造体1 1の中心と長辺Y 1の中点とが略一致する。

なお、角柱構造体1 1の中心とは、平面方向の中心をいう。

本発明において、以上の比率は、シミュレーション（詳しくは後述する）により求めたフルバンドギャップ幅に基づいて採用した。

第5図は、 $x 1 : y 1 = 1 : \sqrt{3}$ に固定し、x 2およびy 2を変動させて行ったフルバンドギャップ幅のシミュレーション結果を示す図である。第5図に示すように、x 2およびy 2を選択することにより、高いフルバンドギャップ幅を得ることができる。

第6図は、所定のx 2、y 2におけるフルバンドギャップ幅の値を記述している。

第6図では、22.5%以上の広いフルバンドギャップ幅が得られているプロットを黒色に塗りつぶしている。黒色プロットは、 $x 1 : x 2 : y 2 = 1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$ の範囲に含まれる。 $1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.148 : 0.53$ の範囲においては、26%以上のフルバンドギャップ幅を得ることができる。また、 $1 : 0.133 : 0.52 \sim 1 : 0.148 : 0.53$ の範囲においては、28%以上のフルバンドギ

ギャップ幅を得ることができる。

次に、以上のシミュレーションによるフルバンドギャップ幅の算出方法の概略を説明しておく。

計算にはフォトニック結晶の透過特性シミュレータである“トランスライト”
5 (Translight) を使用した。このソフトウェアは、アンドリュー・レイノルズ
(Andrew Reynolds) 氏がグラスゴー (Glasgow) 大学に在籍中に開発したもの
である。計算方法としてトランスファーマトリックス法 (Transfer Matrix
Method) を使用している。このソフトウェアでは、円柱および角柱を自由に配
置し、これらの集合体であるフォトニック結晶構造に対しTE波およびTM波
10 を入射したときの反射および透過特性を計算するものである。入射は0～9
0° の任意の角度範囲で行うことができ、任意の周波数範囲に対して解を得る
ことができる。

シミュレータに、計算したいフォトニック結晶構造形状、周波数領域、TE
波とTM波の入射角範囲、および使用する誘電体の誘電率を代入した。入射角
15 は0～90° とした。計算したフォトニック結晶構造はx-y (第3図のx-y
と整合させる必要有) 平面に対して対称形であるため、この入射角でy-z
(第3図のx-yと整合させる必要有) 面から入射するすべての電磁波入射を
カバーしている。これを計算 (シミュレーション) することにより、TE波お
よびTM波の各入射角度において、周波数に対する反射および透過減衰量が得
20 られた。この透過減衰量が50 dB以上である場合にバンドギャップが生じたと
認定した。そこで透過減衰量が50 dB以上である入射角度および周波数を
TE波およびTM波に対して抽出した。ある周波数に対してTE波およびTM
波のすべての入射角に対しバンドギャップが生じているとき、その周波数でフ
ルバンドギャップが形成されたことになる。そこで各周波数に対しフルバンド
25 ギャップの有無を確認した。フルバンドギャップが周波数に対し連続して存在
している場合、その周波数幅を、周波数幅の中心周波数で割った値をフルバン
ドギャップ幅 (%) とした。このフルバンドギャップ幅をフォトニック結晶形
状 (角柱構造体11のx2およびy2の値) に対しプロットしたものが第5図

および第 6 図である。

次に、フォトニック結晶 1 の好適な製造方法を第 7 図および第 8 図を用いて説明する。

この製造方法は、マサチューセッツ工科大学 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) で開発されたスラリーベースの 3 D P (Three Dimensional Printing) プロセスを用いる。この 3 D P プロセスの基本的な手順が第 7 図に示されている。このプロセスを適用できる材料はスラリー化できるものであればよく、材料選択が制約されることがない。例えば、アルミナ (Al_2O_3)、シリコンカーバイド (SiC)、チタン酸バリウム ($BaTiO_3$)、チタン酸ジルコン酸鉛 (PLT)、 $BaO-Nd_2O_3-TiO_2$ などのセラミックはもちろん、アクリルやポリカーボネートなどのプラスチック、Al や Cu、Ag などの金属、Si や GaAs などの半導体を用いることもできる。

3 D P プロセスにおいてはまず、第 7 図に示すように、スラリー作製工程 S 1 で、角柱構造体 1 1 および基部 1 2 を構成する誘電体粉末を溶媒に分散させてスラリー化する。溶媒は、アルコールなどの有機溶媒を用いることができるが、毒性がなく、取り扱いが容易で、誘電体粉末に対する影響が少ないなどの理由から、水をベースとすることが望ましい。必要に応じて溶媒に分散剤などを添加する。2 種類以上の誘電体粉末を用いて角柱構造体 1 1 および基部 1 2 を作製することもできる。

次に、スラリー印刷工程 S 2 で、ジェットプリント法を用いて、誘電体粉末を含むスラリーを基材上の表面に 1 層分だけ印刷形成する。印刷される誘電体層の層厚は、乾燥工程における収縮率などを考慮して決定する。

続くスラリー乾燥工程 S 3 で、スラリー印刷工程 S 2 において印刷形成した誘電体層から溶媒を乾燥、除去する。乾燥させる方法は、自然乾燥でも加熱乾燥でもよい。

次に、バインダ印刷工程 S 4 で、すでに形成した誘電体層の所定部分に、ジェットプリント法によりバインダが印刷塗布される。バインダは、角柱構造体 1 1 および基部 1 2 を構成する部分に塗布される。バインダの吐出量は、誘電

体層の1層分に浸透するように調整させる。

- 5 バインダ印刷工程 S 4 で用いるバインダの種類は特に制限されないが、取り扱いの容易さや、誘電体粉末に対する影響が少ないこと、毒性がないことなどの理由から、水を溶媒とする水溶性のものが好ましい。また、バインダにより硬化されていない粉末を誘電体の成形体から水中で再分散処理して除去する（工程 S 8）ために、バインダは硬化後には非水溶性であることが必要である。さらに、硬化後の機械的強度なども考慮すると、バインダとして熱硬化性樹脂を用いることが好ましく、特にポリアクリル酸（PAA : polyacrylic acid）が好ましい。

- 10 次に、バインダ乾燥工程 S 5 で、誘電体層に浸透させたバインダに含まれる溶媒を乾燥除去する。乾燥方法は、自然乾燥でも加熱乾燥でもよい。このバインダ乾燥工程 S 5 を経た誘電体層は、バインダが浸透した領域に存在する誘電体粉末が当該バインダにより結合される。

- 15 上記のスラリ印刷工程 S 2 からバインダ乾燥工程 S 5 までの各工程を所定回数だけ繰り返す（第 7 図、判断工程 S 6）。そうすると、バインダによって誘電体粉末が結合された領域（結合領域）と、そうでない領域（未結合領域）とが混在したブロック状成形体が形成される。具体的には後述するが、前記結合領域が第 1 誘電体領域をなす角柱構造体 1 1 を、また前記未結合領域が第 2 誘電体領域をなす空隙 1 3 を構成する。この 2 つの結合領域および未結合領域が、
20 平面視して第 2 図、第 3 図に示すように周期的に配置されるように、バインダ印刷工程 S 4 において、バインダを印刷するのである。

上記各工程が所定回数だけ繰り返されたならば、バインダ硬化工程 S 7 に進む。

- 25 バインダ硬化工程 S 7 では、前記各工程の繰り返しにより所定の層数だけ印刷して得た成形体を熱処理するなどして、バインダ印刷工程 S 4 において誘電体層中に浸透されたバインダを十分に硬化させる。この処理により誘電体粉末同士は硬化バインダによってより強く結合されるため、誘電体粉末同士の結合強度が高くなり、後の取り扱いが極めて容易になる。

バインダ硬化工程 S 7 の後に、未結合領域除去工程 S 8 が実施される。

未結合領域除去工程 S 8 では、未結合領域に存在する誘電体粉末を成形体から除去する。この除去は、積層された誘電体層からなる成形体を水に浸漬して行うことができる。つまり、バインダで結合されていない誘電体粉末は、水中
5 に浸漬されることにより、誘電体層から離脱して水中に再分散される。

なお、除去工程（工程 S 8）で、バインダによって結合されていない誘電体粉末が水に再分散しやすいように、スラリ作製工程 S 1 においてスラリ中に分散剤を予め添加しておくことが好ましい。分散剤としては、例えばポリエチレングリコール（PEG：Polyethylene glycol）を用いればよい。再分散を行う
10 ときに、成形体を浸漬する水または当該成形体自身に超音波を印加することが効果的である。

除去工程（工程 S 8）が終了した後に、誘電体粉末がバインダにより角柱構造体 1 1 の形状に結合された成形体を水から引き上げて、乾燥工程 S 9 を実施する。この乾燥工程 S 9 も、自然乾燥でも加熱乾燥でもよい。

15 なお、乾燥工程 S 9 を経た成形体をそのままフォトニック結晶 1 として用いても良いが、必要に応じてさらに焼成工程 S 1 0 で焼成して焼結体としてもよい。焼結体とすることにより、機械的強度や誘電率がさらに向上する。

以上では、バインダ硬化工程 S 7 を経た後に未結合領域除去工程 S 8 を実施した。しかし、バインダが浸透した領域の誘電体粉末の密度、用いるバインダ
20 の性状等によっては、バインダ硬化工程 S 7 を経ることなく、未結合領域除去工程 S 8 を実施することも可能である。本発明は、この形態をも包含している。

次に、上述したフォトニック結晶 1 の製造方法の各工程について第 8 図を参照しつつより具体的に説明する。

第 8 図（a）は、スラリ印刷工程 S 2 においてジェットプリントヘッド 2 2
25 から誘電体粉末を含むスラリ 2 3 を吐出して、基板 2 1 上に 1 層目の誘電体層を形成する様子を模式的に示している。

スラリ吐出用のジェットプリントヘッド 2 2 を 2 次元に走査させながら誘電体粉末を含むスラリ 2 3 を連続的に吐出させることにより、基板 2 1 上の一面

にスラリ 2 3 を 1 層分だけ印刷形成する。なお、ここでは、ジェットプリントヘッド 2 2 を固定して基板 2 1 を移動させても良い。

基板 2 1 が多孔質であると、印刷された誘電体層中の溶媒が基板 2 1 中に吸収されて誘電体粉末の密集度が高くなり、誘電体粉末の成形密度が高くなる。

- 5 この目的のために、基板 2 1 として焼結アルミナなどを用いることができる。なお、スラリ 2 3 を構成する誘電体粉末からなる成形体そのものを基板 2 1 としてもよい。

スラリ乾燥工程 S 3 でスラリ 2 3 中に含まれる溶媒を乾燥除去すると、誘電体層が 1 層分だけ形成される。

- 10 1 層目の誘電体層を形成した後に、第 8 図 (b) に示すように、バインダ印刷工程 S 4 を実施する。

第 8 図 (b) は、バインダ印刷工程 S 4 においてジェットプリントヘッド 2 4 からバインダ 2 5 を吐出して所定部分のみに印刷塗布する様子を模式的に示している。

- 15 バインダ吐出用のジェットプリントヘッド 2 4 を走査しながらバインダ 2 5 を連続的に吐出することにより、印刷形成された誘電体層の全面にバインダ 2 5 を浸透させる。なお、第 8 図においてバインダ 2 5 が浸透した領域には網掛け (グラデーション) を施している。ジェットプリントヘッド 2 4 から吐出されるバインダ 2 5 の量は、誘電体層の全域に十分に浸透するように制御される。

- 20 バインダ 2 5 を印刷塗布した後に、バインダ 2 5 を乾燥除去させるバインダ乾燥工程 S 5 を実施する。

- 1 層目の誘電体層に対するバインダ乾燥工程 S 5 を実施後に、2 層目のスラリ 2 3 の印刷、2 層目の誘電体層に対するバインダ 2 5 の印刷・乾燥、さらに 3 層目のスラリ 2 3 の印刷を上記と同様に実施する。3 層目のスラリ 2 3 を印刷し、スラリ 2 3 中に含まれる溶媒を除去した後に、バインダ 2 5 の印刷を行う。第 8 図 (c) はこの様子を示している。第 8 図 (c) では、ジェットプリントヘッド 2 4 を走査しながら、バインダ 2 5 を断続的に吐出する。第 8 図 (c) において、ハッチングが施されている誘電体層中の白抜きの領域に対応する部

分ではバインダ 2 5 の吐出が停止される。この白抜きの領域にはバインダ 2 5 が浸透していない。

5 層目の誘電体層までは第 8 図 (c) と同様に断続的なバインダ 2 5 の印刷を実行する。こうして得られた成形体が第 8 図 (d) に示されている。

- 5 第 8 図 (d) に示すように、この成形体はバインダ 2 5 が存在する領域と、そうでない領域が周期的に配設されている。第 8 図 (d) に示す成形体は、次にバインダ硬化工程 S 7 に供される。この工程では、成形体中に浸透したバインダ 2 5 を硬化させるための熱処理を施す。

- 10 第 8 図 (e) は、第 8 図 (d) に示す成形体から、バインダ 2 5 により硬化されていない領域 (上述した未結合領域) に存在する誘電体粉末を除去した状態を模式的に示している。バインダ硬化工程 S 7 を経た成形体を基板 2 1 からはずして、水に浸漬する。そうすることにより、成形体中の未結合領域に存在する誘電体粉末を水に再分散して除去する。誘電体粉末が除去された部分は空気が存在する空隙 1 3 となる。このとき、超音波を印加することが有効である。
- 15 誘電体粉末が除去された領域は空隙 1 3 となるから、この成形体は、誘電体粉末が存在する角柱構造体 1 1 と、空気からなる空隙 1 3 とが周期的に配置されたフォトニック結晶 1 を構成する。なお、この構造体をさらに焼成しても良いことは前述の通りである。

- 20 第 8 図 (e) に示す成形体は第 2 誘電体領域として空気を用いるフォトニック結晶 1 であるが、第 2 誘電体領域として空気以外の誘電体材料を用いるフォトニック結晶 1 を作製することもできる。

- 25 第 8 図 (f) は、上述の方法により第 8 図 (e) に示すような成形体または焼結体を作製した後に、その空隙 1 1 3 a に角柱構造体 1 1 1 とは異なる誘電体材料を充填したものを示している。第 1 誘電体領域と第 2 誘電体領域との誘電率の差は、目的とするフォトニック結晶 1 0 0 の特性に応じて決定すればよい。

第 8 図はフォトニック結晶 1 (1 0 0) の側断面について示したものであるが、平面視した場合には、第 3 図に示したように角柱構造体 1 1 が配置される

ようにジェットプリントヘッド24を走査する。このとき、バインダ25は、角柱構造体11（111）が形成される部分に印刷される。

また、以上では、3DPプロセスにより本発明のフォトニック結晶1、100を得る方法について説明したが、ドライエッチング法、自己クローニング法
5 および光造形法など公知の方法によることもできる。各方法について簡単に言及しておく。

ドライエッチング法は、フォトリソグラフィ技術で作製したマスクを用いてエッチングガスにより材料を所望の形状にエッチングする方法である。自己クローニング法は、特定のモードでバイアスパッタリングを行うことにより、
10 基材の凹凸の周期を保存しつつ基材に垂直な方向に材料を堆積させる方法である。また、光造形法は、液状の光硬化性樹脂に紫外光ビームを走査し、照射領域のみ重合反応させて光硬化性樹脂を所望の形状に硬化させる方法である。

これ以外にも、本発明の主旨を逸脱しない限り、上記実施の形態で挙げた構成を取捨選択したり、他の構成に適宜変更することが可能であることはいま
15 でもない。例えば、結晶内に閉じた欠陥領域を形成して光の共振器を得ること、また、この結晶内に線状欠陥を形成して導波路を得ることができる。

産業上の利用可能性

本発明によれば、製造が容易で、かつTE波およびTM波に対して完全バンド
20 ギャップを持つことのできる2次元周期構造を有するフォトニック結晶が提供される。

請 求 の 範 囲

1. 短辺 X 1 の長さが x 1、長辺 Y 1 の長さが y 1 である長方形を単位格子とし、隣接する 4 つの単位格子が 1 つの角を共有するように配列された平面上で、
- 5 短辺 X 2 の長さが x 2、長辺 Y 2 の長さが y 2 である長方形断面を有する柱状の第 1 誘電体領域を、各長方形単位格子の前記短辺 X 1 および前記長辺 Y 1 上に配置した 2 次元フォトニック結晶であって、
 前記短辺 X 1 の中点および前記長辺 Y 1 の中点と前記長方形断面の中心が略一致するように前記第 1 誘電体領域が配置され、
- 10 前記各第 1 誘電体領域の前記長辺 Y 2 同士が互いに略平行をなし、
 $x 1 : y 1 = 1 : \text{略} \sqrt{3}$ であり、
 $x 1 : x 2 : y 2 = 1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$
 であることを特徴とする 2 次元フォトニック結晶。
- 15 2. 前記第 1 誘電体領域は、その長方形断面の前記長辺 Y 2 が単位格子の前記長辺 Y 1 と略平行に配列されていることを特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトニック結晶。
- 20 3. $x 1 : x 2 : y 2 = 1 : 0.135 : 0.48 \sim 1 : 0.150 : 0.5$
 4 であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の 2 次元フォトニック結晶。
4. $x 1 : x 2 : y 2 = 1 : 0.135 : 0.52 \sim 1 : 0.140 : 0.5$
 4 であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の 2 次元フォトニック結晶。
- 25 5. 前記長方形断面のサイズは $0.10 \mu\text{m} \times 0.37 \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の 2 次元フォトニック結晶。
6. 前記第 1 誘電体領域の周囲を取り囲みかつ前記第 1 誘電体領域とは異なる

誘電率を有する第 2 誘電体領域を備え、前記第 1 誘電体領域および前記第 2 誘電体領域のいずれか一方が誘電体材料から構成され、他方が気体から構成されることを特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

- 5 7. 前記誘電体材料は $\text{BaO}-\text{TiO}_2$ 系誘電体材料または $\text{BaO}-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ 系誘電体材料であることを特徴とする請求項 6 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

- 10 8. 平板状の基部と、前記基部と同一の誘電体材料から構成され前記基部から立設する複数の前記第 1 誘電体領域とを備えることを特徴とする請求項 6 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

- 15 9. 前記第 1 誘電体領域の周囲を取り囲みかつ前記第 1 誘電体領域とは異なる誘電率を有する第 2 誘電体領域を備え、前記第 1 誘電体領域および前記第 2 誘電体領域は、各々異なる誘電率を有する誘電体材料から構成されることを特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

- 20 10. 前記第 1 誘電体領域および前記第 2 誘電体領域は焼結体であることを特徴とする請求項 9 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

- 25 11. 平板状の基部と、前記基部から立設し前記基部と同一の誘電体材料から構成される複数の前記第 1 誘電体領域と、前記第 1 誘電体領域の周囲を取り囲む第 2 誘電体領域を備えることを特徴とする請求項 9 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

12. 第 1 誘電体領域と前記第 1 誘電体領域と異なる誘電率を有する第 2 誘電体領域とを周期的に配置した 2 次元フォトニック結晶であって、

長方形断面を有する柱状の前記第 1 誘電体領域と、

前記第 1 誘電体領域の周囲を取り囲む前記第 2 誘電体領域とを備え、

X 方向において隣接する 2 つの前記第 1 誘電体領域の中心同士を結ぶ線分 L_x と、前記 X 方向に直交する Y 方向において隣接する 2 つの前記第 1 誘電体領域の中心同士を結ぶ線分 L_y とが、互いの略中点同士で略直交し、

- 5 前記線分 L_x の長さ x_3 と前記線分 L_y の長さ y_3 の比が $1 : \text{略} \sqrt{3}$ であり、
前記線分 L_x の長さ x_3 、前記第 1 誘電体領域の前記 X 方向の長さ x_2 および前記 Y 方向の長さ y_2 の比が $1 : 0.133 : 0.48 \sim 1 : 0.158 : 0.58$ に設定されることを特徴とする 2 次元フォトニック結晶。

- 10 13. $x_3 : x_2 : y_2 = 1 : 0.135 : 0.48 \sim 1 : 0.150 : 0.54$ であることを特徴とする請求項 12 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

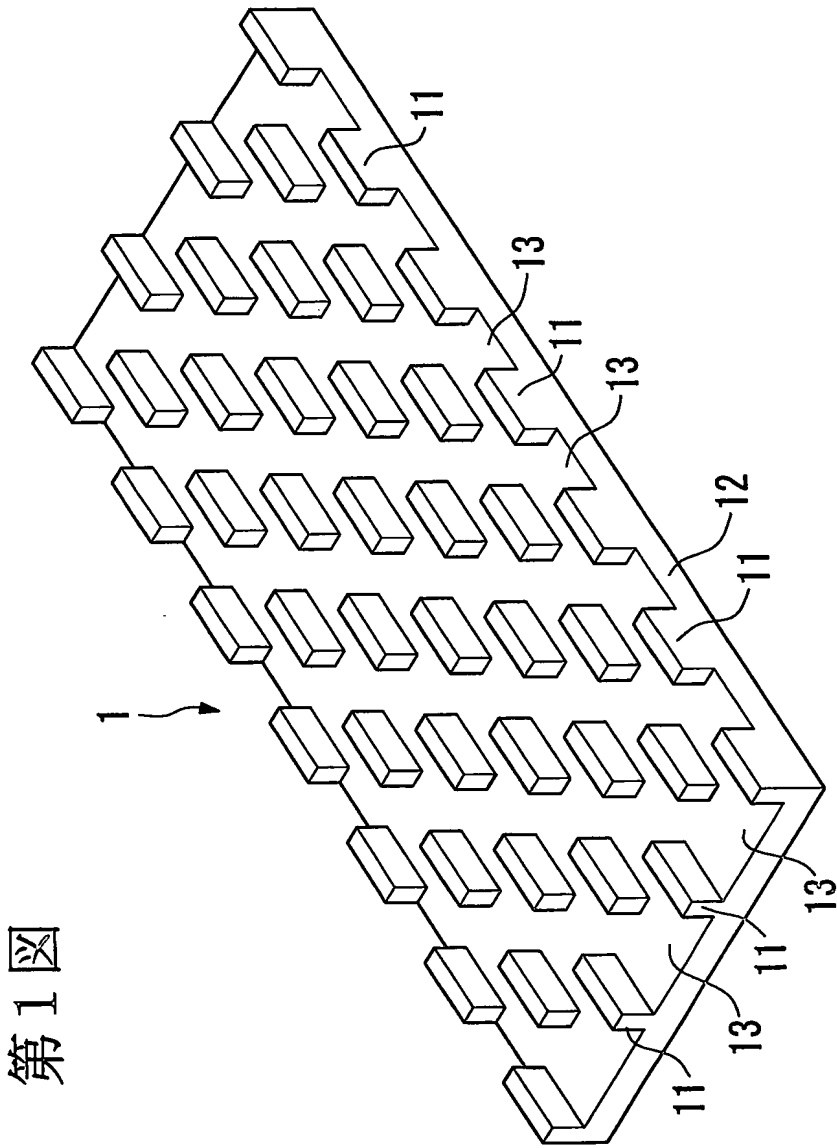
14. $x_3 : x_2 : y_2 = 1 : 0.135 : 0.52 \sim 1 : 0.140 : 0.54$ であることを特徴とする請求項 12 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

15

15. 前記第 1 誘電体領域および前記第 2 誘電体領域のいずれか一方が誘電体材料から構成され、他方が気体から構成されることを特徴とする請求項 12 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

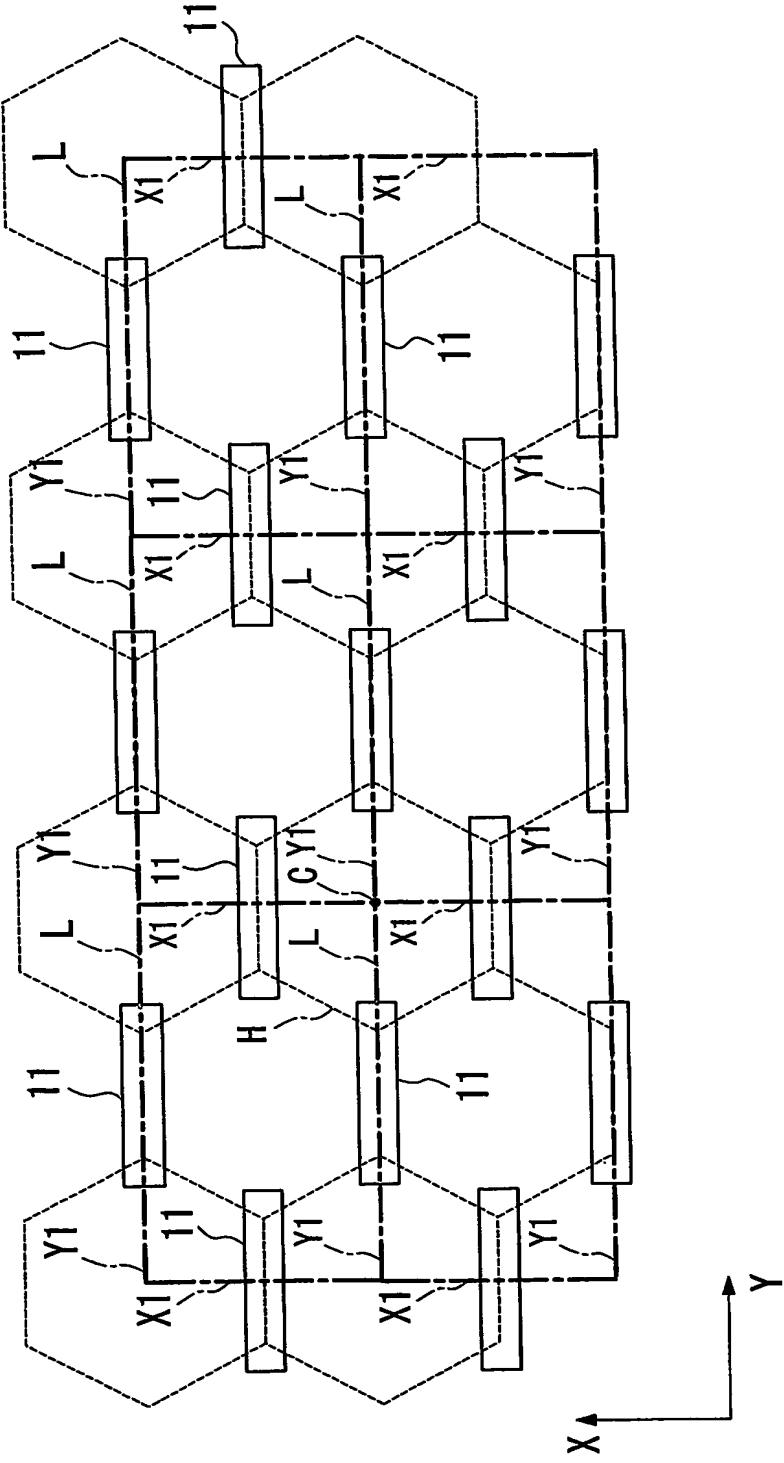
- 20 16. 前記第 1 誘電体領域および前記第 2 誘電体領域は、各々異なる誘電率を有する誘電体材料から構成されることを特徴とする請求項 12 に記載の 2 次元フォトニック結晶。

- 25 17. 前記 2 次元フォトニック結晶は 20.0% 以上のフルバンドギャップ幅を有することを特徴とする請求項 1 または 12 に記載の 2 次元フォトニック結晶。



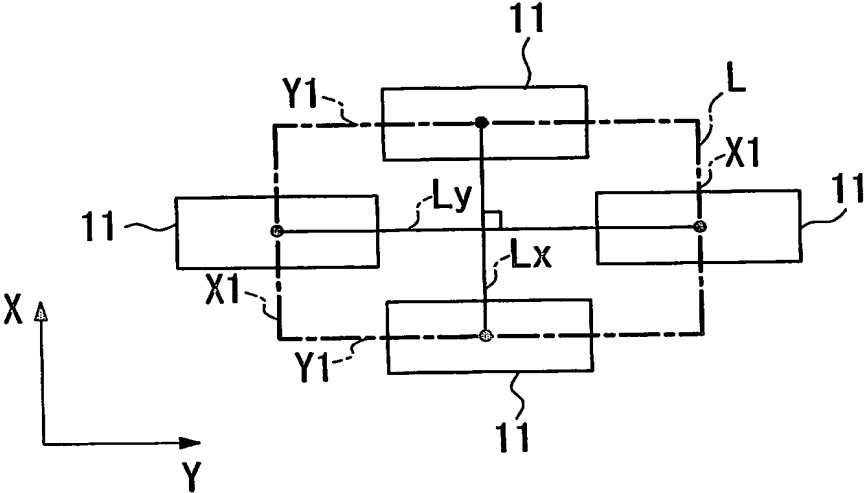
第1図

第2図

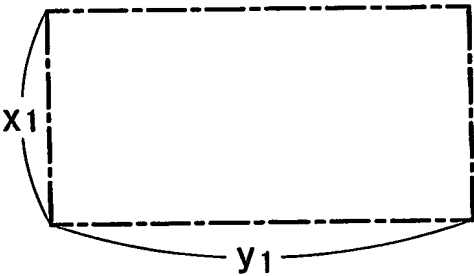


第3図

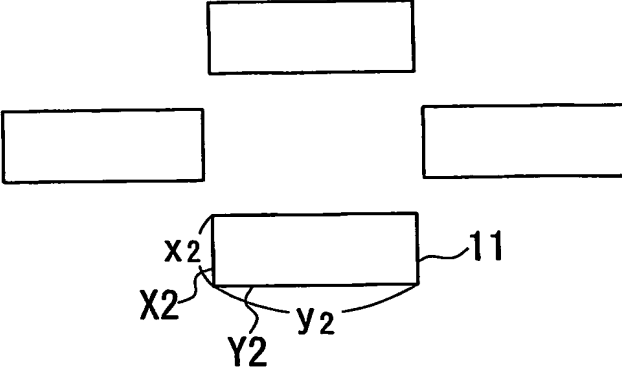
(a)



(b)

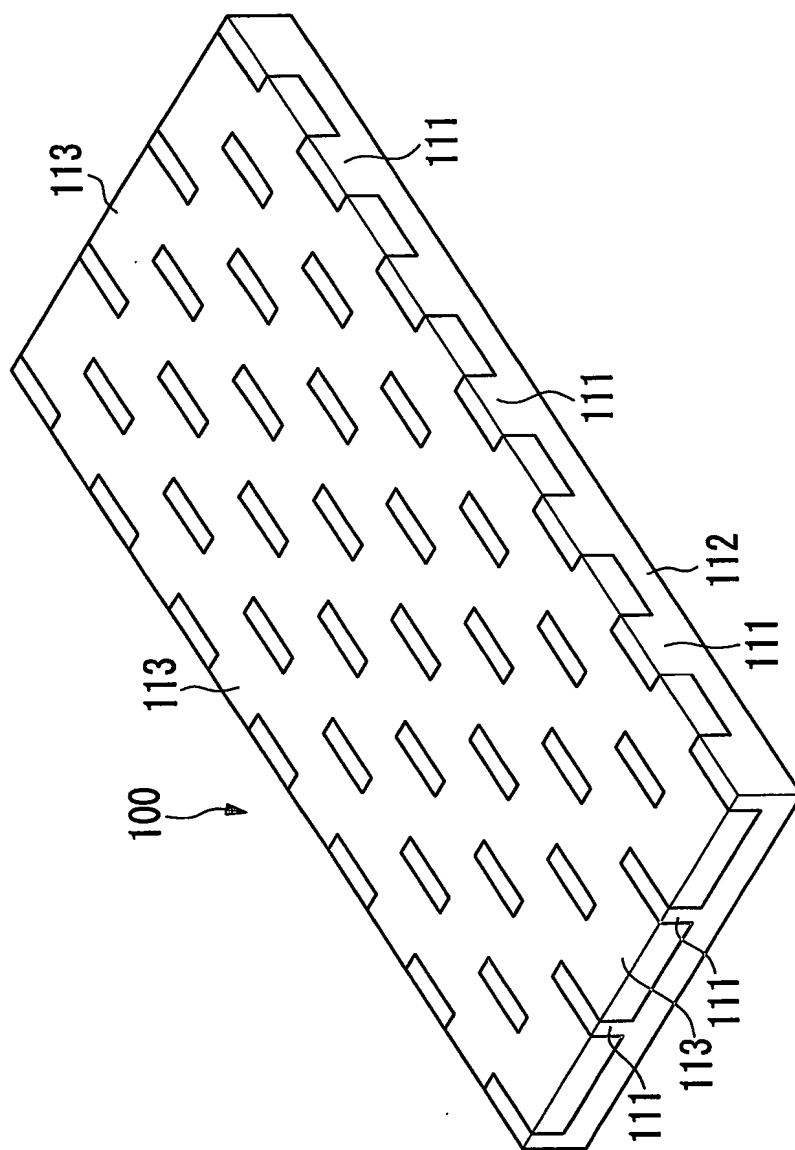


(c)



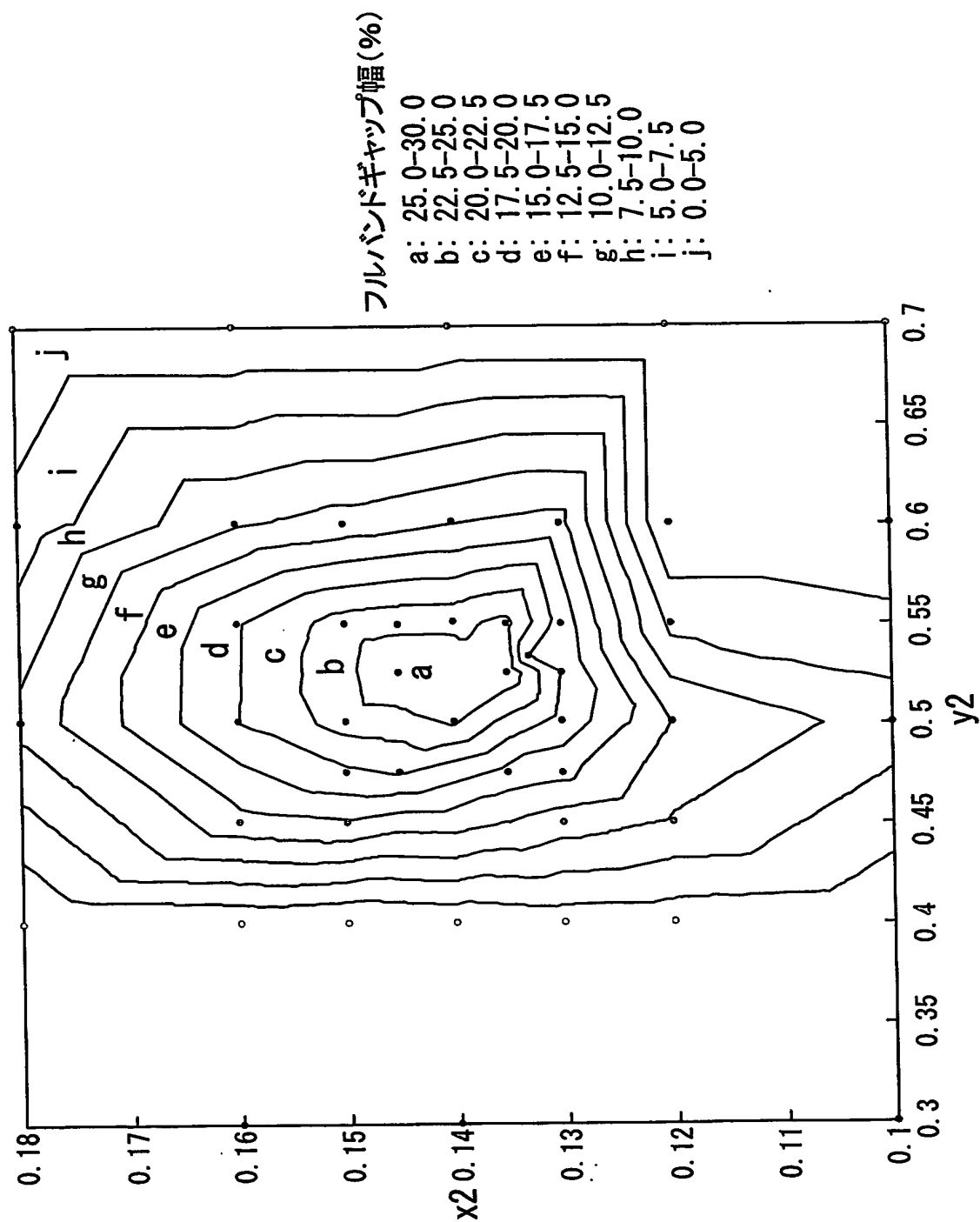
4/8

第4図



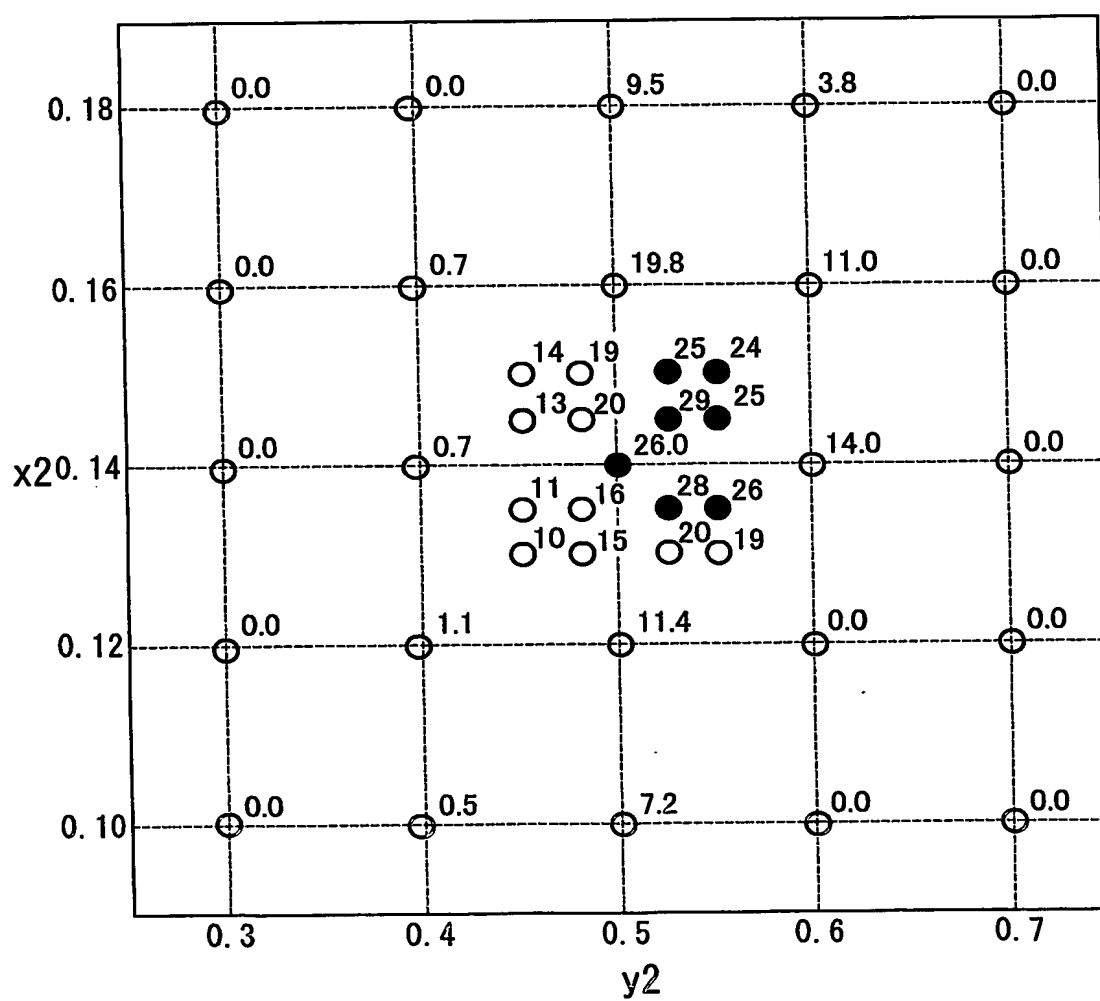
5/8

第5図



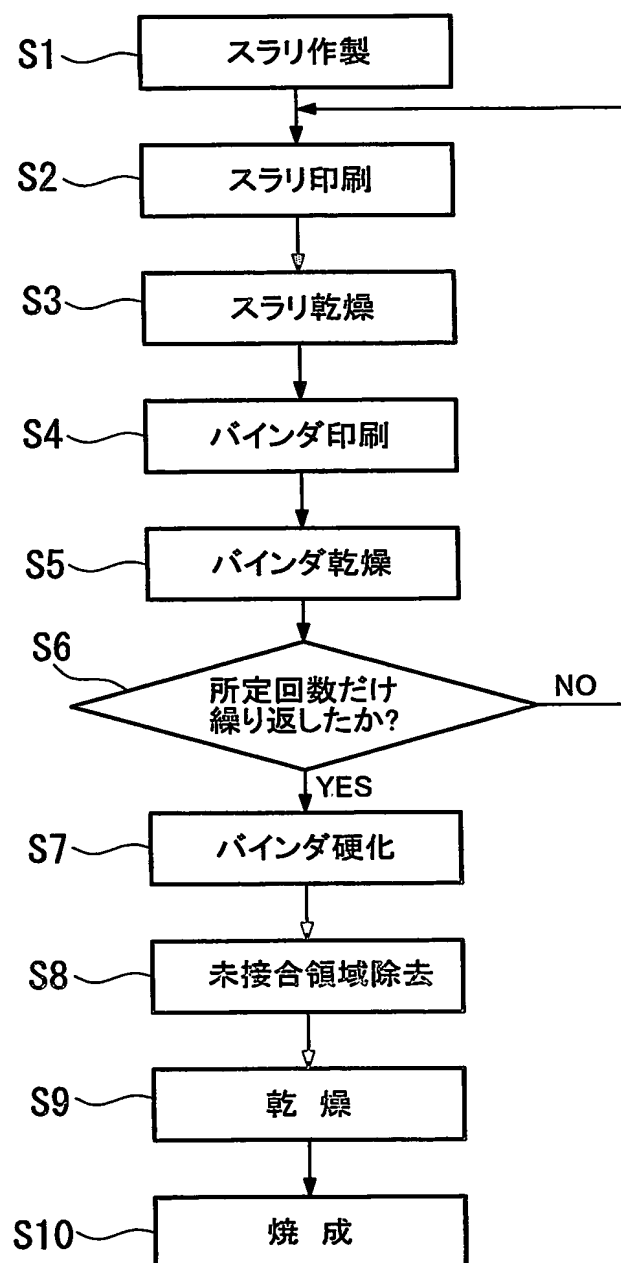
6/8

第 6 図

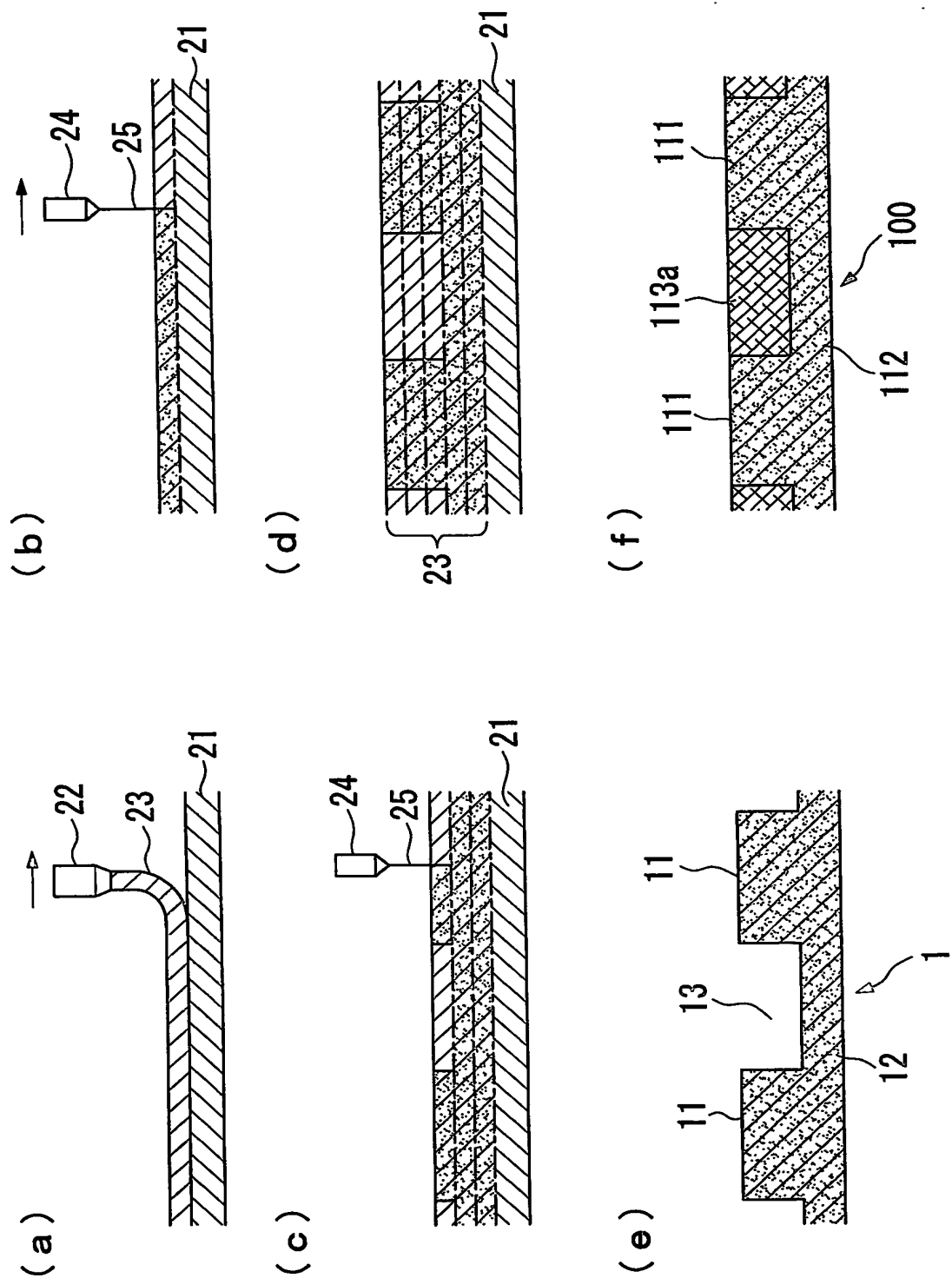


7/8

第 7 図



第8図



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/000107

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G02B1/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G02B1/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2002
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2002	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2002

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2002/0146196 A1 (NEC CORP.), 10 October, 2002 (10.10.02), Par. Nos. [0012] to [0014]; Fig. 1 & JP 2002-303836 A	1-17
Y	JP 2002-162525 A (Minolta Co., Ltd.), 07 June, 2002 (07.06.02), Par. Nos. [0004], [0026] to [0027]; Figs. 1 to 6 (Family: none)	1-17
Y A	JP 2001-072414 A (Japan Science and Technology Corp.), 21 March, 2001 (21.03.01), Par. Nos. [0017] to [0029] (Family: none)	7 1-6, 8-17



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

*

Special categories of cited documents:

"A"

document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E"

earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L"

document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O"

document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P"

document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T"

later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&"

document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

05 February, 2004 (05.02.04)

Date of mailing of the international search report

24 February, 2004 (24.02.04)

Name and mailing address of the ISA/

Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/000107

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	EP 1136853 A1 (TDK Corp. & Kansai Technology Licensing Organization Co., Ltd.); 26 September, 2001 (26.09.01), Full text; all drawings & JP 2001-272555 A	1-17
Y	JP 2001-296442 A (Canon Inc.), 26 October, 2001 (26.10.01), Par. Nos. [0039] to [0041]; Figs. 5, 6 (Family: none)	1-17
Y	US 5739796 A (The United States of America as represented by the Secretary of the Army), 14 April, 1998 (14.04.98), Column 6, line 21 to column 7, line 7; Fig. 3 (Family: none)	1-17
A	US 584400 A (Massachusetts Institute of Technology), 21 July, 1998 (21.07.98), Full text; all drawings (Family: none)	1-17
A	US 6366392 B1 (NEC Corp.), 02 April, 2002 (02.04.02), Full text; all drawings & JP 2000-352631 A	1-17

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G02B 1/02

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G02B 1/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2002年
 日本国登録実用新案公報 1994-2002年
 日本国実用新案登録公報 1996-2002年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	US 2002/0146196 A1 (NEC CORPORATION) 2002. 10. 10, 【0012】 - 【0014】、Fig. 1 & JP 2002-303836 A	1-17
Y	JP 2002-162525 A (ミノルタ株式会社) 2002. 06. 07, 【0004】、【0026】 - 【0027】、【図1】 - 【図6】 (ファミリーなし)	1-17

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に関する文献
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

05. 02. 2004

国際調査報告の発送日

24. 2. 2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号 100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)
 森 竜介

2V 3012

電話番号 03-3581-1101 内線 3271

C (続き) : 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y A	J P 2001-072414 A (科学技術振興事業団) 200 1. 03. 21, 【0017】 - 【0029】 (ファミリーなし)	7 1-6、8- 17
Y	EP 1136853 A1 (TDK Corporation & Kansai Technolog y Licensing Organization Co.,Ltd) 2001. 09. 26, 全 文全図& J P 2001-272555	1-17
Y	J P 2001-296442 A (キヤノン株式会社) 200 1. 10. 26, 【0039】 - 【0041】、【図5】、【図 6】 (ファミリーなし)	1-17
Y	US 5739796 A (The United States of America as repr esented by the Secretary of the Army) 1998. 04. 1 4, 第6欄21行-第7欄7行、Fig. 3 (ファミリーなし)	1-17
A	US 5784400 A (Massachusetts Institute of Technolog y) 1998. 07. 21, 全文全図 (ファミリーなし)	1-17
A	US 6366392 B1 (NEC Corporation) 2002. 04. 02, 全文全図& J P 2000-352631 A	1-17